

光物性測定器開発研究部門（極端紫外光研究施設）

松井文彦（主任研究員）（2018年4月1日～2021年11月15日）
（教授）（2021年11月16日昇任）

萩原健太（特任研究員（IMSフェロー））

松田博之（特任研究員）

石原麻由美（事務支援員）

加茂恭子（事務支援員）

A-1) 専門領域：表面物性物理学，電子分光計測技術，放射光科学

A-2) 研究課題：

- a) 電子分光装置・マルチモーダルスピン分析器の新規開発を突破口とした UVSOR の高度化
- b) 運動量分解光電子分光に関する新規現象を基盤とした測定手法確立
- c) 新奇表面電子物性・化学特性・スピン科学の応用展開

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) ① UVSOR オリジナルの Momentum Microscope (MM) 拠点構築を主務とする。MM は空間・波数空間・エネルギーの幅広い範囲での高分解能測定を可能にするユニークな分析器である。電子物性研究に適した VUV/EUV 領域での高強度・可偏光などといった UVSOR の光源特性を活かした測定機能を実装する MM の導入を実現し、論文・プレスリリースを通じて成果発信を続けている。② 並行して全地球エネルギー・スピン分析器を考案し特許出願した。上記の MM は 3 \AA^{-1} までの波数空間の一括測定ができるため価電子帯研究で有効な運動エネルギー 36 eV 以下の領域では全地球をカバーすることができるが、原子配列を研究するのに有効な運動エネルギー 500 eV 以上の領域ではせいぜい 15° の領域でしかない。新規分析器は 2 keV でも全地球の放出光電子を取り込むことができ、後段のスピン偏向器でスピンの 3 次元ベクトル解析ができるようになる。①は high-end 型価電子帯光電子分光装置、②は内殻光電子ホログラフィー測定装置である。両者を融合させ、スピン 3 次元ベクトル解析を実・逆空間で自在にマッピングできる唯一無二の装置を構築する。
- b) 物性評価に適した光波長帯の連続的なエネルギー可変性が UVSOR の最大の特徴である。BL6U は軟 X 線領域 ($45\text{--}700 \text{ eV}$) をカバーする直線偏光ビームラインである。③ 分子科学で重要となる CNO 吸収端の光を用い、元素選択的な共鳴励起によって価電子帯の原子軌道構成を解明できる共鳴光電子分光の実験を成功させた。特に、吸収端にてグラファイトの π バンドが選択的に励起される様子を波数空間上で可視化した。共鳴 Auger 電子スペクトルに価電子帯分散があらわれる現象の発見は重要である。グラフェンから π 共役系分子への展開に歩を進め、お家芸としての共鳴光電子回折法を確立しつつある。本年は「運動量分解光電子顕微鏡法」を新たに確立しグラファイトの単原子層ステップの可視化に成功し、プレスリリースを行った。④ 光エネルギー可変性を活かした k_z 分散測定による全 Brillouin 域価電子帯分散マッピングや偏光特性を活かした原子軌道波動関数解析技術は BL6U での共同研究推進の基盤であるが、さらに精緻な測定を行い、表面特有の電子状態や現象の情報を引き出す研究展開を進めている。
- c) 光電子回折・分光を用いて典型的な高温超伝導体 Bi2212 や代表的層状物質 TaSe_2 , TiSe_2 の相転移前後の電子状態をとらえた。graphite 表面の単原子層ステップの顕微像の撮影に成功した (*Phys. Rev. B* 2022) は大きな前進である。新たに確立した顕微 ARPES/ARPES 顕微法の論文 (*J. Phys. Soc. Jpn.* 2022) は Editor's Choice に選定された。劈開試

料表面の局所部分の精密分析の成功は今後の共同研究を呼び込む重要な成果である。共同研究先から Ir 単結晶薄膜の電子状態評価の依頼を受け、バンド分散の測定に成功した。この薄膜は新しいスピン 2 次元フィルターとして有望な材料であり、上記で述べたスピン 3 次元ベクトル解析への応用展開につながるものである。

B-1) 学術論文

E. HASHIMOTO, K. TAMURA, H. YAMAGUCHI, T. WATANABE, F. MATSUI and S. KOH, “Characterization of Epitaxial CVD Graphene on Ir(111)/ α -Al₂O₃(0001) by Photoelectron Momentum Microscopy,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **61(SD)**, SD1015 (2022). DOI: 10.35848/1347-4065/ac4ad8

F. MATSUI and S. SUGA, “Coupling of k_z -Dispersing π Bands with Surface Localized States in Graphite,” *Phys. Rev. B* **105(23)**, 235126 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevB.105.235126

松井文彦, 「光電子運動量顕微鏡：局所フェルミオロジーと内殻共鳴」, *固体物理*, **57(7)**, 423 (2022).

F. MATSUI, Y. OKANO, H. MATSUDA, T. YANO, E. NAKAMURA, S. KERA and S. SUGA, “Domain-Resolved Photoelectron Microscopy and μ m-Scale Momentum-Resolved Photoelectron Spectroscopy of Graphite Armchair Edge Facet,” *J. Phys. Soc. Jpn.* **91(9)**, 094703 (2022). DOI: 10.7566/JPSJ.91.094703

F. MATSUI, H. OTA, R. EGUCHI, H. GOTO, K. KOBAYASHI, J. AKIMITSU, H. OZAKI, T. NISHIOKA, K. KIMURA, K. HAYASHI, T. SHIMANO, N. HAPPO and Y. KUBOZONO, “Multiple-Site Ag Doping in Bi₂Se₃: Compositional Crossover from Substitution to Intercalation as Revealed by Photoelectron Diffraction and X-Ray Fluorescence Holography,” *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **264**, 147295 (2023). DOI: 10.1016/j.elspec.2023.147295

P. KRÜGER and F. MATSUI, “Observation and Theory of Strong Circular Dichroism in Angle-Resolved Photoemission from Graphite,” *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **258**, 147219 (2022). DOI: 10.1016/j.elspec.2022.147219

O. ENDO, F. MATSUI, S. KERA, W. J. CHUN, M. NAKAMURA, K. AMEMIYA and H. OZAKI, “Observation of Hole States at Perylene/Au(110) and Au(111) Interfaces,” *J. Phys. Chem. C* **126(37)**, 15971–15979 (2022). DOI: 10.1021/acs.jpcc.2c04060

T. KATO, Y. LI, K. NAKAYAMA, Z. WANG, S. SOUMA, F. MATSUI, M. KITAMURA, K. HORIBA, H. KUMIGASHIRA, T. TAKAHASHI, Y. YAO and T. SATO, “Fermiology and Origin of T_c Enhancement in a Kagome Superconductor Cs(V_{1-x}Nb_x)₃Sb₅,” *Phys. Rev. Lett.* **129(20)**, 206402 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.206402

N. V. VLADIMIROVA, A. S. FROLOV, J. SÁNCHEZ-BARRIGA, O. J. CLARK, F. MATSUI, D. YU USACHOV, M. MUNTWILER, C. CALLAERT, J. HADERMANN, V. S. NEUDACHINA, M. E. TAMM and L. V. YASHINA, “Occupancy of Lattice Positions Probed by X-Ray Photoelectron Diffraction: A Case Study of Tetradymite Topological Insulators,” *Surf. Interfaces* **36**, 102516 (2023). DOI: 10.1016/j.surf.2022.102516

B-4) 招待講演

松井文彦, 「もう一つの顕微ARPES：光電子運動量顕微法 世界動向とUVSORの現状」, ナノテラスARPESシンポジウム, 仙台, 2023年2月.

松井文彦, 「UVSORにおける先端計測拠点構築：光電子運動量顕微鏡」, 日本表面真空学会中部支部研究会, 名古屋, 2022年11月.

F. MATSUI, “Photoelectron Momentum Microscope at UVSOR-III BL6U, Okazaki,” DESY PETRA-3 seminar, Hamburg (Germany), November 2022.

F. MATSUI, “Surface resonance and monoatomic step of graphite surface imaged by Photoelectron Momentum Microscope,” 14th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices ’22, Nago (Japan), October 2022.

B-5) 特許出願

EP4075475, “Spherical Aberration Adjustment Cathode Lens, Spherical Aberration Correction Electrostatic Lens, Electron Spectroscopy, and Photoemission Electron Microscope,” H. MATSUDA and F. MATSUI (National Institutes of Natural Sciences), 2020年.

B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

日本表面真空学会理事 (2021.5–2023).

日本放射光学会庶務幹事 (2021.9–2023).

学会の組織委員等

表面構造に関する国際学会 ICSOS 国際アドバイザー委員 (2017–).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

日本学術振興会 R026 先端計測技術の将来設計委員会運営委員 (2019–).

日本学術振興会運営委員 (2022–2023).

学会誌編集委員

日本表面真空学会出版委員 (2013–).

B-8) 大学等での講義, 客員

総合研究大学院大学物理科学研究科, 「光物理」, 2022年7月–2022年8月.

B-10) 競争的資金

科研費基盤研究(C), 「全角取り込み光電子分光法の開発」, 松田博之 (2021年度–2025年度).

科研費国際共同研究加速基金 (国際共同研究強化(B)), 「光電子波数顕微鏡法で切り拓くナノスピン・オービトロニクス」 (代表: 解良 聡), 松井文彦 (研究分担者) (2019年度–2022年度).

科研費挑戦的研究(開拓), 「ドーバントの価数ごとの立体原子配列を観測する小型測定装置の研究」 (代表: 松下智裕), 松井文彦 (研究分担者) (2021年度–2025年度).

B-11) 産学連携

共同研究, SPECS Surface Nano Analysis GmbH, 「Development of 2D-projection analyzers」, 松井文彦 (2022年度–2024年度).

C) 研究活動の課題と展望

UVSOR 型 Momentum Microscope (MM) 利用研究を推進する。顕微角度分解光電子分光, 共鳴光電子分光, 3D 波数空間分解光電子分光法を協力研究に供するとともに自身の表面物性科学研究を進める。軟X線ビームラインと VUV ビームライン両方を同時に MM に導く two-beam MM 実験ステーションをデザインし, 建設段階に入った。2020年度は片方(BL6U)での運用が始まった。2022年度に 2D スピンフィルタを導入し, 9月末にデータ取得開始にこぎつけた。2022年度以降 2本目のビームラインに接続, MM の将来の拡張として 2次元スピン検出器を用いたスピン分解光電子分光によるスピン物性研究の展開を計画しているが, その基礎研究として磁性薄膜・キラル分子膜の電子状態・原子構造研究を進める。

MM 開発の先駆者がいる Forschungszentrum Jülich (FZJ) の電子物性部門 (PGI-6) と学術協定を結び, 表面電子物性の共同研究を進めてきたおかげで, UVSOR でも MM が順調に立ち上がった。時間分解型の MM 開発を進めるドイツ・DESY の M. Hoesch らとも共同研究を密にし, こちらからスピン研究に関して相手から時間分解測定法に関して経験技術交流を進めている。本装置を活かした実験を積極的に進めるユーザーコミュニティ構築のための第 1回 (2019)・第 2回 (2020.10) 国際ワークショップ・第 3回 (2022.10) 国際会議特別セッション共催に続き, 東アジア圏での MM 開発グループの萌芽のネットワークづくりに取り掛かり, また FHI・HiSOR・ALS 各機関との合同セミナーで招待講演を行った。UVSOR の国内外からのビジビリティを高めるとともに, 他のビームラインにも先端拠点を目指す機運と風土の定着を活動指針として進めている。